УДК 69.058.2

© М. О. Лобовский, магистрант

© А. Л. Туккия, старший преподаватель

© П. А. Пяткин, доцент

© Е. О. Хегай, магистр

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: lobovskiy.m@mail.ru, atlector@mail.ru,

pyatkin@itr.spb.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-58-63

© М. О. Lobovskiy, undergraduate

© А. L. Tukkiya, senior lecturer

© P. A. Pyatkin, Associate Professor

© E. O. Khegay, MSci

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: lobovskiy.m@mail.ru, atlector@mail.ru,

pyatkin@itr.spb.ru

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И УСИЛИЙ В СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОМЕТРА

MEASURING OF DEFORMATIONS AND FORCES IN ROD ELEMENTS USING A MICROMETER

Изучение напряженно-деформированного состояния позволяет понять, как работают элементы конструкций в реальных условиях эксплуатации. Целью данного исследования является анализ существующих методов, применяемых для мониторинга зданий и сооружений, а также создание универсального, недорогого и простого метода измерения деформаций и усилий в стержневых элементах с использованием микрометра. Результаты лабораторных испытаний показали, что новый метод ничем не уступает существующим электрическим, акустическим и тензорезистивным методам контроля НДС, а даже по некоторым параметрам, таким как простота установки, мобильность, защищенность, экономичность, превосходит их. Точность измерения усилий до 7%, определенная при испытаниях в лабораторных условиях, подтверждает возможность использования данного метода для мониторинга существующих конструкций.

Ключевые слова: тензометрия, измерения, микрометр, приборы, способы мониторинга, напряженно-деформированное состояние.

The study of the stress-strain state (SSS) gives an indication how structural elements work in real operating conditions. The purpose of this study was to analyze the existing methods used for monitoring of buildings and structures, as well as to create a universal, inexpensive, and simple method for measuring deformations and forces in rod elements using a micrometer. As the results of laboratory tests have shown, the new method is in no way inferior to the existing electric, acoustic and strain resistance methods of SSS control, surpassing them in some parameters, such as ease of installation, mobility, security, cost-effectiveness. The accuracy of measuring forces up to 7 % assessed during laboratory tests confirms the possibility of using this method for monitoring of existing structures.

Keywords: tensometry, measurements, micrometer, devices, monitoring methods, stress-strain state.

Развитие информационных технологий приводит к увеличению темпов проектирования и усложнению проектных решений. В этих условиях возрастает и вероятность возникновения проектных ошибок. Для компенсации роста такой вероятности появляется необходимость в повышении объема и качества мероприятий по мониторингу [4] на этапе строительства. Одной из основных составляющих мониторинга является контроль напряженно-деформированного

состояния (НДС) [6] конструкций и, в частности, контроль механических напряжений и усилий, для чего применяются методы тензометрии [1, 14]. Из них в строительстве в настоящее время применяются электрический [5], акустический [7] и тензорезистивный методы. Все большее применение находит оптический метод [8], а механический метод [2] почти не используется. Уход от механического метода связан с такими неоспоримыми преимуществами электронных

методов, как цифровое представление данных измерений, удобство и скорость считывания информации, а также возможность ее дистанционной передачи. Но у группы электронных и оптических методов есть и существенные недостатки: высокая стоимость оборудования; высокие требования к квалификации персонала; уязвимость инструментов к внешним воздействиям и, как следствие, высокая стоимость и трудоемкость их защиты от механических воздействий во время строительства.

В связи с этим тензометрия [13] и определение усилий в элементах используются чаще всего при мониторинге строительства уникальных сооружений. Недоступность контроля усилий в несущих конструкциях объектов нормального уровня ответственности, которые нередко по своей сложности не уступают уникальным объектам, не позволяет вовремя предотвратить возникновение аварийных ситуаций.

К причинам возникновения аварий [9] можно отнести также и ошибки при эксплуатации и ремонте, поэтому простые и экономичные способы контроля НДС актуальны и на этих стадиях.

Данные трудности позволяет решить предлагаемый авторами способ измерения деформаций с помощью микрометра, относящийся к механическим методам [15]. Этот способ позволяет проводить анализ деформированного состояния как в период строительства, так и во время эксплуатации конструкции.

В данном способе используется принцип, подобный тому, который в свое время применялся при измерениях с помощью компаратора Душечкина КД-2 [3]. Отличительными особенностями являются: отсутствие эталона, конструкция марок и конструкция измерительного прибора, в качестве которого применен микрометр с шагом дискретности 1 мкм и пределом допускаемой погрешности ± 3 мкм. Применению компараторов препятствует то, что в настоящее время они не производятся.

Техническое решение измерений заключается в следующем:

1. В месте измерения деформаций на конструкцию устанавливаются две марки на базовом расстоянии, равном 95 ± 3 мм, что максимально приближено к верхнему пределу измерений прибора. Такой размер базы выбран с целью сниже-

ния погрешности при измерениях, но при этом участок измерения не должен иметь большого градиента деформаций, что накладывает некоторое ограничение на выбор места измерения. Обе марки располагаются на оси, проходящей вдоль предполагаемого направления главного напряжения. Марка представляет собой (рис. 1) цилиндрический стержень с обнизкой, на плоскости которой выполнена лунка под измерительные губки микрометра. Для крепления к конструкции стержень имеет резьбу. В стальной конструкции предварительно просверливаются отверстия и в них нарезается резьба, а в бетонной конструкции пробуривается отверстие под установку клинового анкера с соответствующей резьбой под марку. Марки фиксируются контргайками, а обнизка защищается накручивающимся колпачком.

2. Выполняются начальные измерения расстояния с помощью микрометра с коническими губками (рис. 2). Во время измерения фиксируется температура материала на участке измерений и температура скобы микрометра. Для измерения температуры используется контактный электронный термометр с шагом измерений $0,1^\circ\text{C}$ и погрешностью $\pm(1^\circ\text{C} \pm 1\% \text{ от измеряемого значения})$. Для повышения точности измерений и удобства работы у микрометра поддерживается температура $20 \pm 1^\circ\text{C}$, что осуществляется с помощью изолированного кейса с термостатом.

Рис. 1. Марка для измерения деформаций

Рис. 2. Проведение измерений на конструкции

3. На период между измерениями марки надежно защищаются стальным кожухом, закрепляемым на самонарезающих винтах или дюбелях.

4. После загрузки или разгрузки конструкции проводятся повторные измерения, в результате которых определяется смещение марок относительно друг друга и вычисляются осредненные значения относительных деформаций в пределах измеряемой базы с учетом поправки на температуру. По известной диаграмме «деформация — напряжение» определяются возникшие за период наблюдений приращения напряжений, а при определенном количестве марок в контролируемом сечении элемента можно определить приращение усилий.

Достоинствами данного способа являются: достаточно высокая точность измерений, простота использования, мобильность оборудования, возможность проведения мониторинга конструкций на любых стадиях возведения и эксплуатации, аппаратура и приспособления имеют

низкую стоимость, марки легко и надежно защищаются от внешних воздействий. Недостатком является отсутствие возможности дистанционного контроля.

Осенью 2019 г. в механической лаборатории СПбГАСУ был протестирован описанный способ, отработаны технология изготовления марок и их установки, установлены требования к измерительному оборудованию, вычислена погрешность измерений с учетом влияния температуры. Метод успешно апробирован в полевых условиях, результаты апробации будут приведены в следующих публикациях.

В ходе отработки метода нужно отметить следующую особенность: точность результатов данного способа наиболее существенно зависит от конструкции марки и наконечника микрометра. Для получения приемлемых результатов необходимо обеспечить плотный контакт между маркой и наконечником микрометра. После ряда попыток для этого был выбран микрометр с коническими (точечными) наконечниками и определенными требованиями к величине радиуса закругления острия. Микрометр изготавливался по специальному заказу. Основной проблемой в разработке явился поиск размеров и технологии выполнения лунки, которая нужна для стабильного позиционирования наконечника. Очень простая, на первый взгляд, деталь оказалась значительным препятствием в осуществлении способа: небольшие отклонения приводили к совершенно неприемлемым результатам. Также важна надежность фиксации марки в конструкции. Эта задача после некоторых затруднений была успешно решена.

Погрешность микрометра была проверена на тарировочной машине Аистова [10], имеющей цену деления 0,01 мкм. Установлено, что погрешность микрометра не превышает ± 2 мкм.

Тестовые измерения (рис. 3) проводились на разрывной машине, оборудованной экстензометром. В качестве тестового образца была выбрана стальная пластина поперечным сечением 50×4 мм.

В результате измерений установлено, что общая погрешность метода с учетом погрешностей при измерении температуры и погрешностей расстановки марок по сечению составляет не более 10 % при вычислении окончательного

Рис. 3. Образец для лабораторных испытаний в разрывной машине

усилия в элементе. Следует отметить, что тестовые измерения выполнялись на пластине очень маленького сечения, где влияние точности позиционирования сказывается на точности вычисления усилия в образце в большей степени, чем для крупноразмерного элемента.

При дополнительных тестовых измерениях на крупноразмерных образцах возможно повышение точности измерения усилий до 7 %. В любом случае точность измерения до 10 % позволяет успешно применять этот способ при мониторинге. В качестве объектов измерения можно назвать распорки и контурные балки шпунтового ограждения [11, 12]. Полученный способ позволит определить действительные усилия в элементах распорной системы и оценить точность геотехнических расчетов. Также возможно использовать этот способ для поэтажного измерения вертикальных деформаций строящихся многоэтажных зданий. По предварительным оценкам погрешность измерения накопленных в процессе строительства вертикальных дефор-

маций колонн здания высотой 100 м составит ± 3 мм. На данный момент приемлемых по цене средств контроля данного параметра не существует. К тому же, как показывает практика, имеющиеся стационарные средства контроля с большой долей вероятности повреждаются во время проведения строительства.

Библиографический список

1. Сазыкин И. А. Обследование и испытание сооружений. М.: РГОТУПС, 2003. 93 с.
2. Таюкин Г. И. Приборы и оборудование для статических испытаний строительных конструкций: лабораторный практикум. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. 140 с.
3. Абрашитов В. С., Туманов В. А., Тамбовцев Е. Н., Туманов А. В. Обследование и испытание зданий и сооружений. Лабораторный практикум. 2-е изд., доп. и перераб. Пенза: ПГУАС, 2014. 112 с.
4. Гайнуллин М. М., Абдулаев М. М., Лебедев Г. В., Сенькин Е. В. Принципы построения систем мониторинга технического состояния зданий и сооружений //

Материалы XX науч.-метод. конф. ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». СПб.: ВИТУ, 2016. С. 175–180.

5. Васильков С. Д., Улыбин А. В. Оценка напряженно-деформированного состояния и ресурса стальных балок с помощью резистивного электроконтактного метода // Материалы XIII науч.-метод. конф. ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». СПб.: ВИТУ, 2009. С. 39–43.

6. Карпаш А. М., Тацакович Н. Л., Доценко Е. Р. Особенности применения современных методов контроля для определения напряженно-деформированного состояния металлических конструкций // Научные известия. 2016. № 1 (187). С. 319–324.

7. Зацепин А. Ф. Акустический контроль / под ред. В. Е. Щербинина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 211 с.

8. Запруднов В. И., Серегин Н. Г. Методы и средства мониторинга технического состояния строительных конструкций // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2019. Т. 23. № 5. С. 108–115.

9. Леденёв В. В., Скряльов В. И. Аварии, разрушения и повреждения. Причины, последствия и предупреждения. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2017. 439 с.

10. Аистов Н. Н. Универсальный прибор системы Аистова для проверки тензометров, клинометров, сдвигомеров и других приборов, измеряющих деформации твердых тел: описание машины и инструкция. Л.: [б. и.], 1954. 29 с.

11. Верстов В. В., Гайдо А. Н., Иванов Я. В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий / под ред. В. В. Верстова. СПб. [и др.]: Лань, 2014. 365 с.

12. Ренгач В. Н. Шпунтовые стенки. Расчет и проектирование. Л.: Стройиздат, 1970. 112 с.

13. Баутин А. А., Свирский Ю. А., Панков А. В., Воронков Р. В. Способы применения волоконно-оптических датчиков деформаций в системах мониторинга // Прикладная фотоника. 2018. Т. 5, № 4. С. 391–407.

14. Лексовский А. М., Баскин Б. Л., Улыбин А. В. Применение рентгеновской тензометрии для определения напряженно-деформируемого состояния // Материалы XI науч.-метод. конф. ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». СПб.: ВИТУ, 2007. С. 57–62.

15. Ключев В. В., Соснин Ф. Р., Филинов В. Н. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1995. 487 с.

References

1. Sazykin I. *Obsledovaniya i ispytaniya sooruzheniy* [Surveys and tests of structures]. Moscow, RGOTUPS Publ., 2003, 93 p.

2. Tayukin G. I. *Pribory i oborudovanie dlya staticheskikh ispytaniy stroitel'nykh konstruksiy* [Devices and equipment for static testing of building structures]. *Laboratorniy praktikum* [laboratory practical course]. Tomsk, Tom. gos. arkhiv. - stroit. un-t Publ., 2011, 140 p.

3. Abrashitov V. S., Tumanov V. A., Tambovtsev E. N., Tumanov A. V. *Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzheniy. Laboratorniy praktikum* [Inspection and testing of buildings and structures. Laboratory practice]. 2-nd ed., revised. Penza, PGUAS Publ., 2014, 112 p.

4. Gaynullin M. M., Abdulaev M. M., Lebedev G. V., Sen'kin E. V. *Printsipy postroeniya sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy* [Principles of building systems for monitoring the technical condition of buildings and structures]. *Trudy XX nauchno-metodich. konf. VITU «Defekty zdaniy i sooruzheniy. Usilenie stroitel'nykh konstruksiy»* [Proc. of the XX scientific and methodical conf. VITU "Defects of buildings and structures. Strengthening of building structures"]. St. Petersburg, VITU Publ., 2016, pp. 175–180.

5. Vasil'kov S. D., Ulybin A. V. *Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i resursa stal'nykh balok s pomoshch'yu rezistivnogo elektrokontaktnogo metoda* [Evaluation of the stress-strain state and resource of steel beams using resistive electrocontact method]. *Trudy XIII nauchno-metodich. konf. VITU «Defekty zdaniy i sooruzheniy. Usilenie stroitel'nykh konstruksiy»* [Proc. of the XIII scientific and methodical conf. VITU "Defects of buildings and structures. Strengthening of building structures"]. St. Petersburg, VITU Publ., 2009, pp. 39–43.

6. Karpash A. M., Tatsakovich N. L., Dotsenko E. R. *Osobennosti primeneniya sovremennykh metodov kontrolya dlya opredeleniya-napryazhenno deformirovannogo sostoyaniya metallicheskh konstruksiy* [Features of application of modern control methods for determining the stress-strain state of metal structures]. *Nauchnye izvestiya – Scientific news*, 2016, no. 1 (187), pp. 319–324.

7. Zatspepin A. F. *Akusticheskiy kontrol'* [Acoustic control]. Ed. by Shcherbinin V. E. Ekaterinburg, Ural. un-t Publ., 2016, 211 p.

8. Zaprudnov V. I., Seregin N. G. *Metody i sredstva monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh konstruksiy* [Methods and means of monitoring the technical condition of building structures]. *Lesnoy vestnik – Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 108–115.

9. Ledenyov, V. V., Skrylyov V. I. *Avarii, razrusheniya i povrezhdeniya. Prichiny, posledstviya i preduprezhdeniya* [Accidents, destruction and damage. Reasons, consequences and warnings]. Tambov, TGTU Publ., 2017, 440 p.

10. Aistov N. N. *Universal'niy pribor sistemy Aistova dlya proverki tenzometrov, klinometrov, sdvigomerov i drugih priborov, izmeryayushchikh deformatsii tverdykh tel* [Universal device of the Aistov system for checking strain gauges, clinometers, shear meters and other devices]

that measure deformations of solids]. *Opisanie mashiny i instruktsiya* [Description of the machine and instructions]. Leningrad, Leningr. Inzh.-stroit. in-t. Mekhan. Laboratoriya Publ., 1954, 29 p.

11. Verstov V. V., Gaydo A. N., Ivanov Ya. V. *Tekhnologii ustroystva ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroyki i akvatoriy* [Technologies of construction of pit fences in conditions of urban development and water areas]. Ed. by Verstov V. V. St. Petersburg, Lan Publ., 2014, 365 p.

12. Rengach V. N. *Shpuntovye stenki raschet i proektirovanie* [Sheet metal walls calculation and design]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1970, 112 p.

13. Bautin A. A. Svirskiy Yu. A., Pankov A. V., Voronkov R. V. *Sposoby primeneniya volokonno-opticheskikh datchikov deformatsiy v sistemakh monitoring* [Methods of application of fiber-optic strain sensors in monitoring

systems]. *Prikladnaya fotonika – Applied Photonics*, 2018, no. 4, pp. 391–407.

14. Leksovskiy A. M., Baskin B. L., Ulybin A. V. *Primenenie rentgenovskoy tenzometrii dlya opredeleniya napryazhenno-deformiruemogo sostoyaniya* [Application of x-ray tensometry for determination of stress-strain state]. *Trudy XI nauchno-metodich. konf. VITU «Defekty zdaniy i sooruzheniy. Usilenie stroitel'nykh konstruktsiy»* [Proc. of the XI scientific and methodical conf. VITU "Defects of buildings and structures. Strengthening of building structures"]. St. Petersburg, VITU Publ., 2007, pp. 57–62.

15. Klyuev V. V., Sosnin F. R., Filinov V. N. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika. Spravochnik* [Non-destructive testing and diagnostics. Reference book]. Ed. by Klyuev V.V. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995, 447 p.